

تأثیر سطح مقطع مجرای تهویه طبیعی و مکانیکی بر روی حرکت جریان دود در تونل

مترجم: سمانه ایزدفر



از رایج‌ترین راه‌ها برای کنترل جریان دود در تونل استفاده از سامانه تهویه طولی است. با افزایش طول تونل، کارایی سامانه تهویه طولی که فقط از جت فن برای ایجاد جریان طولی هوا در تونل استفاده می‌کند کاهش می‌یابد. یک راه حل برای افزایش عملکرد این سامانه تهویه در هنگام آتش‌سوزی در تونل‌های طویل، ترکیب کردن جت فن با مجرای تهویه است. جریان دود از طریق مجرای خارج شده و پخش و گسترش دود در فاصله‌ای مشخص از مجرای تهویه محدود می‌گردد و بدین ترتیب امکان فرار مسافران افزایش می‌یابد.



چکیده

مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهند که سطح مقطع خروجی مجرای تهویه طبیعی تأثیر قابل توجه بر روی خروج جریان دود و کاهش دما در زیر سقف تونل دارد اما در مجرای تهویه مکانیکی افزایش سطح مقطع نه تنها سبب افزایش خروج جریان دود از تونل نمی‌شود بلکه موجب برگشت جریان دود به سمت بالادست مجرای تهویه می‌گردد.

کلمات کلیدی: آتش‌سوزی در تونل، تهویه طولی، مجرای تهویه مکانیکی و طبیعی

۱- مقدمه

کنترل آتش و جریان دود ناشی از آن برای افزایش ایمنی تونل‌ها و حفظ جان مسافران و کاهش تلفات انسانی اهمیت فراوان دارد، زیرا که کاهش دید مسافران و به موجب آن کاهش افرادی که می‌توانند راه خروج را بیابند و استنشاق گازهای سمی از عوامل مهم در افزایش تلفات جانی است. یکی از رایج‌ترین راه‌ها برای کنترل جریان دود استفاده از سامانه تهویه طولی است

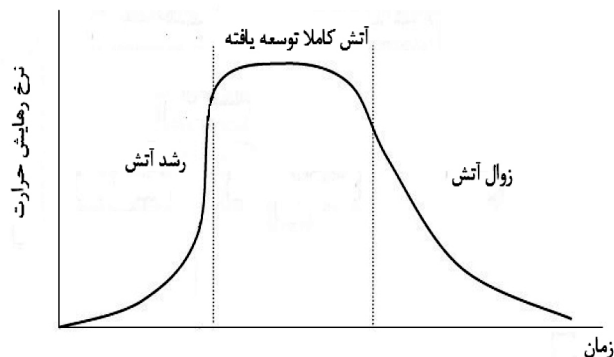
از رایج‌ترین راه‌ها برای کنترل جریان دود در تونل استفاده از سامانه تهویه طولی است. با افزایش طول تونل، کارایی سامانه تهویه طولی که فقط از جت فن برای ایجاد جریان طولی هوا در تونل استفاده می‌کند کاهش می‌یابد. یک راه حل برای افزایش عملکرد این سامانه تهویه در هنگام آتش‌سوزی در تونل‌های طولی، ترکیب کردن جت فن با مجرای تهویه است. جریان دود از طریق مجرای خارج شده و پخش و گسترش دود در فاصله‌ای مشخص از مجرای تهویه محدود می‌گردد و بدین ترتیب امکان فرار مسافران افزایش می‌یابد. در این مقاله، یک سامانه تهویه طولی با مجرای تهویه در هنگام آتش‌سوزی در تونل شبیه‌سازی شد تا اثر سطح مقطع مجرای تهویه بر روی توزیع دما و جریان دود در تونل بررسی شود. دو نوع عملکرد طبیعی و مکانیکی برای مجرای تهویه در نظر گرفته شد. شبیه‌سازی با کمک کد FDS نسخه ۵،۵،۳ انجام شد و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی



شرکت آسان آسای
چیلر / هوا ساز / روفتاپ پکیج / فن کویل / برج خنک کن
www.assanassay.com

Assan Assay
Make The Sky Blue

شرکت اکسون تهویه پارس
داکت اسپیلیت، چیلر، فن کویل، هوا ساز، VRF
www.axontahvieh.com



شکل ۱: نمودار نرخ رهایش حرارت نسبت به زمان [۱۳]

عددی جهت مطالعه یک سامانه تهویه طولی که از یک مجرای تهویه مکانیکی به عنوان سامانه تخلیه برای خروج جریان دود استفاده می‌کند پرداختند. ژانگ و همکارانش [۸] کارایی سامانه تهویه طولی همراه با یک مجرای تهویه طبیعی در یک تونل جاده‌ای در هنگام آتش‌سوزی مورد بررسی قرار دادند، نتایج نشان می‌دهد که اثر انباشتگی^۶ عامل تعیین‌کننده در عملکرد مجرای تهویه طبیعی است. فن و همکاران [۹] به بررسی تهویه طبیعی یک تونل جاده‌ای همراه با مجرای پرداخته‌اند و نحوه توزیع هوا ورودی به مجرای را مورد مطالعه قرار دادند. کیم و کیم [۱۰] تأثیر موقعیت مجرای‌های تهویه در تونل مترو بر عملکرد تهویه طبیعی یا اثر پیستونی قطار بررسی کردند. در پژوهشی دیگر توسط هانگ و همکاران [۱۱] تعداد و هندسه داکت (مجرای) تهویه در محل اتصال به تونل بر عملکرد تهویه طبیعی در یک تونل مترو تک خطه بررسی شد.

در این مقاله با استفاده از کد FDS نسخه ۵،۵،۳ که مدل دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی آتش و جریان‌های ناشی از آن است به بررسی توزیع دما در زیر سقف تونل با تهویه طولی همراه با مجرای تهویه پرداخته شده و اثر سطح مقطع مجرای در دو حالت مکانیکی و طبیعی بر روی حرکت جریان دود و توزیع دما در تونل مورد مطالعه قرار گرفت.

۲- مدل‌سازی مسأله

۲-۱- مدل‌سازی آتش و دود

که با ایجاد یک جریان هوا با سرعت متناظر با سرعت بحرانی تهویه از برگشت جریان دود به سمت بالادست جلوگیری کرده و بدین ترتیب دود و گازهای داغ مجبور به حرکت در راستای جریان تهویه می‌شوند اما با افزایش طول تونل، کارایی سامانه تهویه طولی رایج که فقط از جت فن^۲ استفاده می‌کند کاهش می‌یابد. از این رو نیاز است با تغییر در طراحی، کارایی این نوع سامانه را در هنگام آتش‌سوزی افزایش داد. یک راه حل ترکیب کردن جت فن با مجرای تهویه است. در شرایط عادی وظیفه مجرای تهویه تعویض هوای آلوده با هوای تازه است و در شرایط اضطراری وظیفه مجرای تهویه، خارج کردن دود و محدود کردن پخش و گسترش دود در فاصله‌ای مشخص از مجرای تهویه به کار می‌رود. خروج جریان دود منجر به کاهش دما در تونل شده و امکان فرار مسافران، افزایش می‌یابد. در حالت مجرای تهویه طبیعی، جریان دود و گازهای داغ به دلیل نیروی بویانسی^۳ یا اثر دودکشی^۴ از طریق مجرای تهویه خارج شده و در مجرای تهویه مکانیکی، جریان مکشی ایجاد شده توسط فن، جریان طولی را در دو طرف مجرای تولید می‌کند و سبب خروج دود از تونل می‌گردد. مطالعات فراوانی بر روی سرعت بحرانی تهویه و طول جریان برگشت دود [۱-۳] و توزیع دمای بیشینه در زیر سقف تونل [۴-۵] انجام شده است. واکوئیلین و تله [۶] با یک کار آزمایشگاهی به بررسی سرعت محدودکننده^۵ حداقل سرعتی که از برگشت جریان دود در پایین‌دست مجرای تهویه جلوگیری می‌کند پرداخته‌اند. اینگاسون و فردریک سکو [۷] با استفاده از مدل میدانی، نرم‌افزار فلوئنت، به بررسی امکان‌سنجی روش‌های

- 1- Critical velocity ventilation
- 2- Jet fan
- 3- Bouyancy force
- 4- Stack effect
- 5- Confinement velocity



منحنی آتش سوزی در یک محیط بسته دارای قسمت‌های مختلفی دارد اما از سه مرحله اصلی تشکیل می‌شود [۱۲]. شکل ۱ نمونه‌ای از منحنی آتش درون یک محیط بسته را نشان می‌دهد. در مرحله اول آتش در حال رشد و گسترش است و میزان سوخت در دسترس عامل تعیین کننده است و از این رو آتش در این مرحله سوخت-کنترلی^۱ است. مرحله دوم، مرحله‌ای است که نرخ رهایش حرارت^۲ ناشی از آتش سوزی بیشترین مقدار خود را دارد و در این مرحله کل مواد اشتعال پذیر مشتعل می‌شوند که این امر به میزان اکسیژن در دسترس بستگی دارد. هر چه میزان اکسیژن بیشتر باشد نرخ رهایش حرارت بیشتر خواهد بود. از این رو آتش در این مرحله، تهویه-کنترلی^۳ است. مرحله آخر، مرحله‌ای است که سوخت به پایان خود نزدیک شده و آتش خاموش می‌شود. همچنین نرخ تولید دود نیز از نرخ رهایش حرارت پیروی می‌کند و رفتاری مشابه با تغییرات نرخ حرارت در طول زمان خواهد داشت.

۲-۲- مدل ریاضی

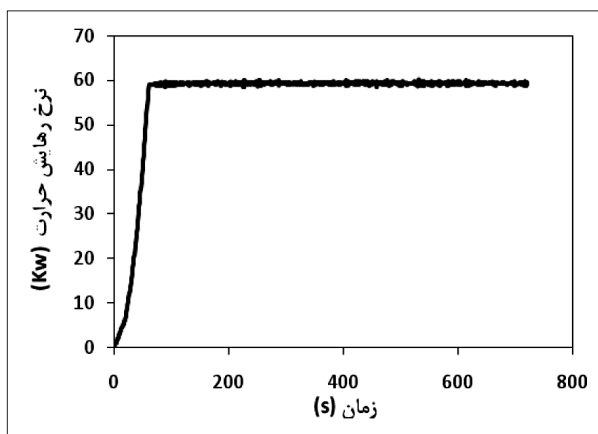
برای شبیه‌سازی هندسه مورد مطالعه از CFD استفاده شده است. کدهای زیادی برای شبیه‌سازی پدیده آتش سوزی وجود دارد. در این مقاله، کد FDS که یک مدل CFD برای جریان سیال ناشی از آتش سوزی است انتخاب گردید [۱۴]. این کد فرم ویژه‌ای از معادلات ناویر-استوکس^۴ برای جریان‌های سرعت پایین که توسط حرارت به حرکت در می‌آیند را با تمرکز بر دود و انتقال حرارت ناشی از آتش سوزی به شکل عددی حل می‌کند. هسته اصلی الگوریتم حل یک طرح صریح پیشگویی-اصلاح گر^۵ با دقت مرتبه دوم در زمان و مکان است. این بدین معنی است که مشتقات جزئی موجود در معادلات پایداری جرم، مومنتم و انرژی به کمک روش تفاضل محدود^۶ با دقت مکانی و زمانی مرتبه دوم گسسته شده و در زمان به صورت صریح^۷ حل می‌شود. پدیده تشعشع به کمک روش حجم کنترل^۸ محاسبه شده و آشفستگی به وسیله فرم اسمگورینسکی^۹ مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^{۱۰} اعمال می‌شود [۱۵].

۲-۳- شبیه‌سازی عددی

برای تصدیق حل و مدل سازی صورت گرفته در کد FDS از

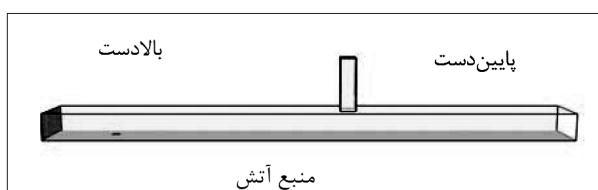
- 1- Fuel-control
- 2- Heat Release Rate(HRR)
- 3- Ventilation-control
- 4- Navier-Stokes
- 5- Predictor-corrector
- 6- Finite difference
- 7- Explicit
- 8- Finite volume
- 9- Smagorinsky
- 10- Large Eddy Simulation(LES)



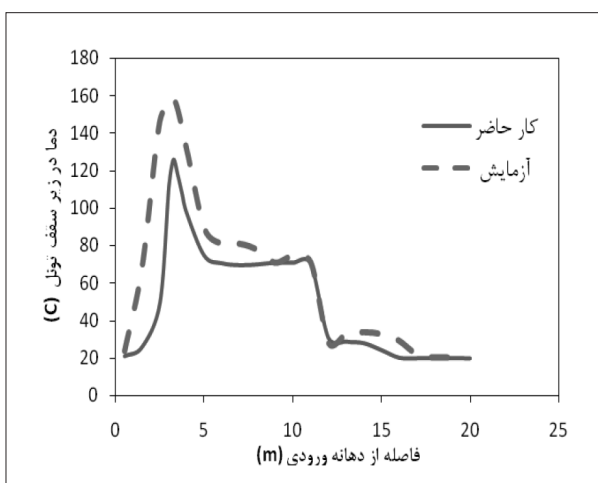


شکل ۲: نمودار نرخ رهائش حرارت نسبت به زمان با ناحیه رشد درجه دوم،

بیشینه نرخ رهائش حرارت $59/64 \text{ kW}$



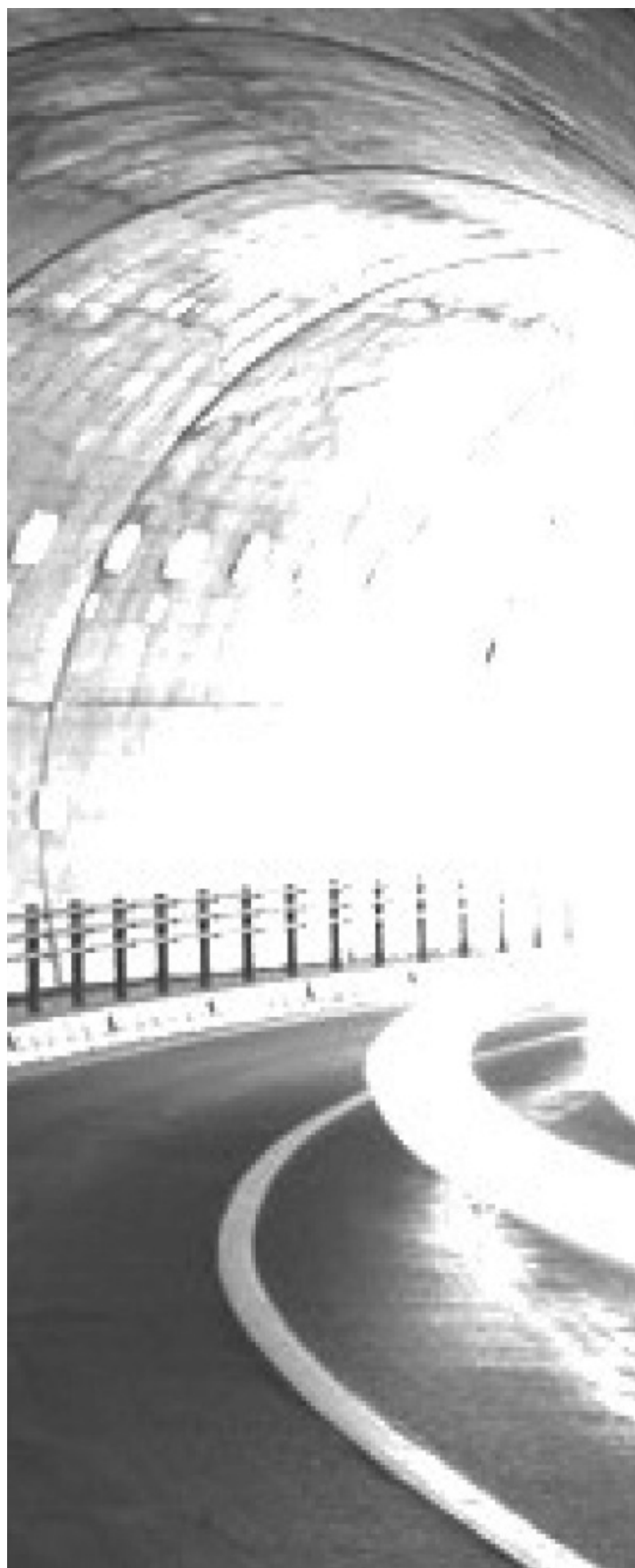
شکل ۳: هندسه تونل مدل شده با یک مجرای تهویه در کد

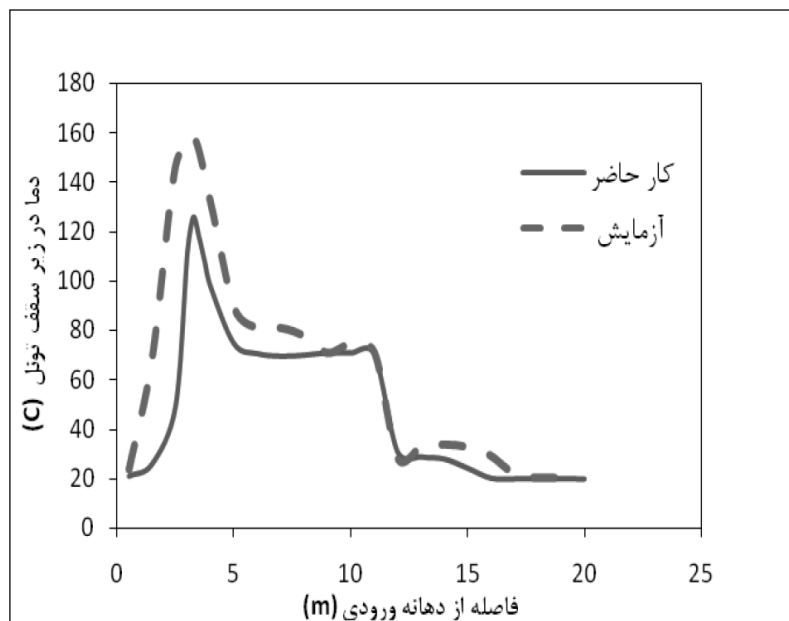


شکل ۴: نمودار تغییرات توزیع دما در زیر سقف تونل در سامانه تهویه طولی

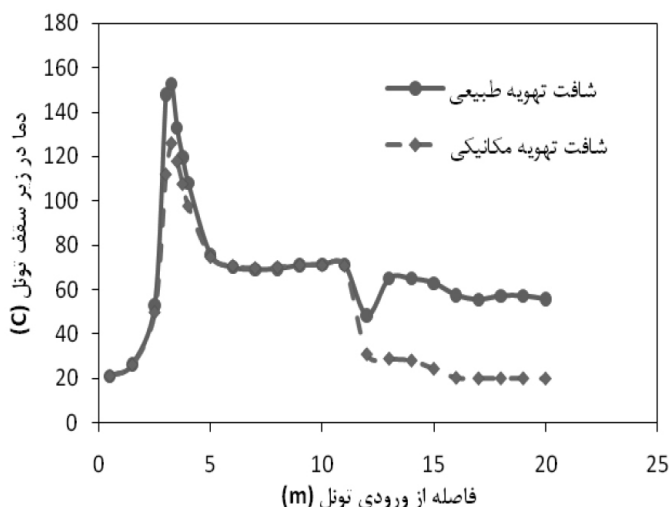
همراه با یک مجرای تهویه مکانیکی

هندسه تونل موجود در منبع شماره [۷] استفاده می‌شود. برای این کار دما در زیر سقف تونل در یک شرایط خاص به دست آمده و با نتایج تجربی حاصل از مرجع فوق مقایسه می‌شود. تونل مدل شده دارای طول 20 m ، عرض 2 m و ارتفاع 1 m است. مش‌بندی در ناحیه‌ای که آتش‌سوزی و تولید نرخ رهائش حرارت در آن صورت





شکل ۵: نمودار تغییرات دما در زیر سقف تونل در دو حالت مجرای تهویه مکانیکی و طبیعی



شکل ۶: نمودار تأثیر ابعاد سطح مقطع مجرای تهویه طبیعی بر روی توزیع دما در زیر سقف تونل

۱۱/۵ از ورودی تونل قرار گرفته است. نرخ رهایش حرارت از منبع آتش مطابق با شکل ۲ تغییر می‌کند که دارای یک رشد درجه دوم و یک مقدار ثابت بیشینه $59/64 \text{ kW}$ می‌باشد که نشان‌دهنده بیش‌ترین نرخ رهایش حرارت است.

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_0 C_p T_0 \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (1)$$

می‌گیرد به دلیل حل معادله توربولانسی با روش گردابه‌های بزرگ به اندازه کافی ریز زده شد تا نتایج قابل قبول شود. از این رو اندازه مش δx به گونه‌ای تعیین شود تا در روابط (۱) و (۲) صدق کند [۱۴]. در مدل‌سازی یک مش با اندازه $0/05 \text{ m} * 0/05 \text{ m} * 0/05 \text{ m}$ در سراسر تونل به کار گرفته شده است. منبع آتش در فاصله $2/5 \text{ m}$ و مجرای تهویه با ابعاد $2 \text{ m} * 0/6 \text{ m} * 0/6 \text{ m}$ در





همچنین در حالتی که مجرای تهویه مکانیکی است از شرط دبی جریان حجمی^۳ استفاده شده است. سرعت تهویه طولی ورودی از دهانه تونل

$$4 < \frac{D^*}{\delta x} < 16 \quad (2)$$

برای ورودی تونل از شرط سرعت ورودی^۱ و برای خروجی تونل و خروجی مجرای تهویه طبیعی از شرط فشار خروجی^۲ استفاده می‌شود.

3- Volumetric flow rate

1- Velocity_inlet
2- Pressure_outlet



پویان
پارس

مهندسی، تامین کالا و اجرای
پروژه های تاسیساتی (EPC)

www.pouyanpars.ir

جدول ۱: حالت‌های مورد بررسی در سامانه تهویه طولی با یک مجرای تهویه طبیعی

حالت	ابعاد مجرای تهویه	دبی جریان خروجی	سرعت جریان خروجی
	$(m * m * m)$	$(m^3.s^{-1})$	$(m.s^{-1})$
(۱)	$0.6 * 0.6 * 2$	۰.۷	۱/۸۱
(۲)	$0.9 * 0.6 * 2$	۰.۸۵	۲/۱۴
(۳)	$1.2 * 1.2 * 2$	۲	۱/۸۴

۳- نتایج

شکل ۵ توزیع دما در زیر سقف تونل در دو حالت مختلف عملکرد مجرای تهویه به صورت طبیعی و مکانیکی که سطح مقطع خروجی آن‌ها $0.6 m * 0.6 m$ است، نمایش می‌دهد. در مجرای تهویه طبیعی به دلیل نیروی بویانسی ناشی از اختلاف ارتفاع یا اثر دودکشی، جریان دود با سرعت $1 m.s^{-1}$ از مجرای تهویه خارج می‌شود و به همین دلیل در محل مجرای تهویه یک افت دما دیده می‌شود؛ اما دما بلافاصله بعد از مجرای تهویه طبیعی افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده برگشت جریان دود به سمت پایین دست مجرای تهویه است. در مجرای تهویه مکانیکی یک جریان مکشی توسط فن با دبی جریان $2.5 m^3.s^{-1}$ ایجاد می‌شود که سبب افزایش خروج جریان دود از مجرای تهویه شده و بدین ترتیب دما بعد از مجرای تهویه افت چشمگیری می‌یابد، به طوری که جریان دود در فاصله‌ای به طول $3/2 m$ بعد از مجرای تهویه دیده می‌شود.

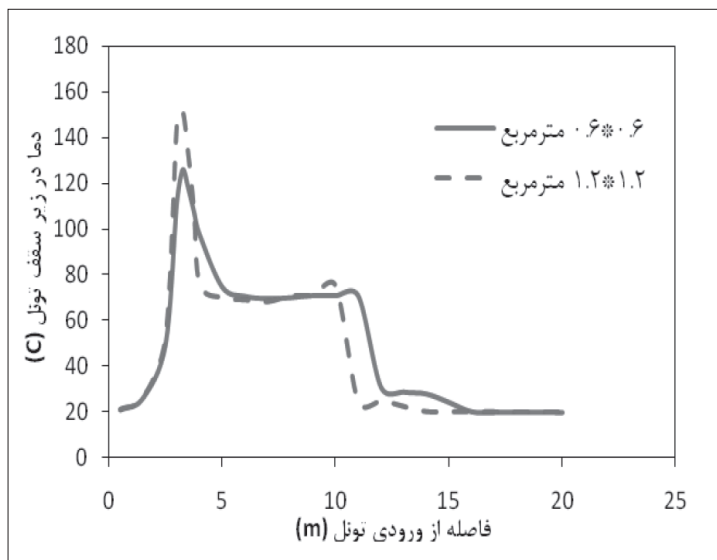
جدول ۲: حالت‌های مورد بررسی در سامانه تهویه طولی با یک مجرای تهویه مکانیکی

حالت	ابعاد مجرای تهویه	دبی جریان خروجی	سرعت جریان خروجی
	$(m * m * m)$	$(m^3.s^{-1})$	$(m.s^{-1})$
(۱)	$0.6 * 0.6 * 2$	۲/۵	۸/۲
(۲)	$0.9 * 0.9 * 2$	۲/۵	۴
(۳)	$1.2 * 1.2 * 2$	۲/۵	۲/۲
(۲)	$0.9 * 0.6 * 2$	۲/۵	۵/۹۴
(۳)	$1.2 * 0.6 * 2$	۲/۵	۴/۳

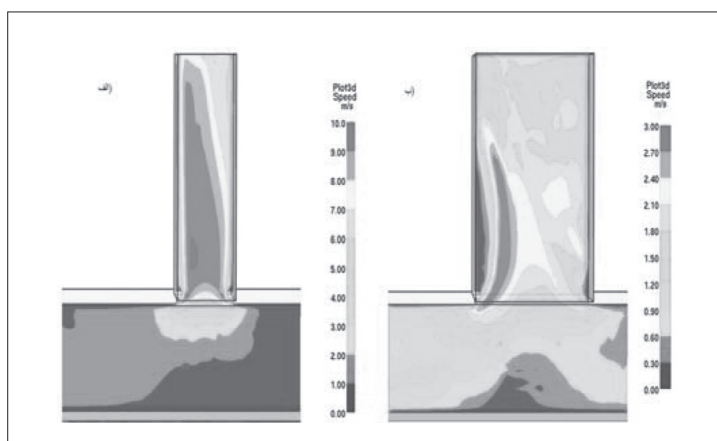
در همه حالات ثابت و برابر با $1 m.s^{-1}$ و دبی جریان خروجی در حالت مجرای تهویه مکانیکی $2.5 m^3.s^{-1}$ است. شکل ۴ نمونه‌ای از هندسه تونل مدل شده در تونل در ابعاد مختلف سطح مقطع خروجی مجرای تهویه طبیعی نشان می‌دهد. همان گونه نرم‌افزار را نشان می‌دهد.

شکل ۴ نتایج حاصل از مدل‌سازی و مقایسه آن با کار تجربی نمایش می‌دهد. که مشخص است با افزایش سطح مقطع، دما در همان‌طور که مشخص است منحنی‌های توزیع دما در زیر سقف تونل از نظر شکل پایین دست مجرای تهویه کاهش می‌یابد. مطابق مشابه همدیگر هستند و تنها اختلاف در ناحیه نزدیک به آتش دیده می‌شود. جدول ۱ با افزایش سطح مقطع مجرای تهویه دلیل این اختلاف می‌تواند ناشی از تفاوت در پیش‌بینی سرعت بحرانی تهویه در و یکسان بودن ارتفاع، دبی جریان خروجی از شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی باشد. به طوری که اثر خنک‌کنندگی سرعت مجرای تهویه طبیعی افزایش می‌یابد. به عبارتی تهویه موجب کاهش دما در زیر سقف تونل و در بالای منبع آتش می‌شود. اختلاف در حالتی که ارتفاع مجرای تهویه یکسان است،





شکل ۷: نمودار تأثیر ابعاد مختلف مجرای تهویه مکانیکی بر روی توزیع دما در زیر سقف
تونل در سامانه تهویه طولی همراه با یک مجرای تهویه مکانیکی



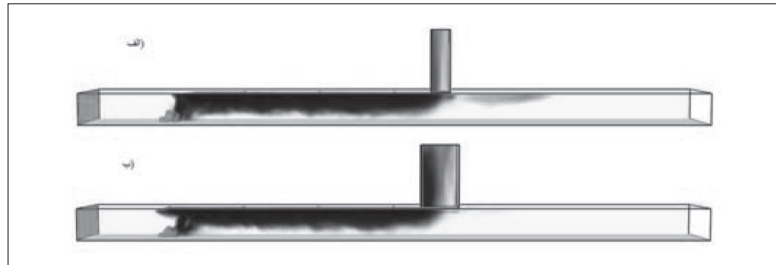
شکل ۸: توزیع سرعت در مجرای تهویه،

الف) سطح مقطع مجرای تهویه $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ ب) $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$

پیش‌بینی سرعت بحرانی تهویه در شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی باشد. به‌طوری‌که اثر خنک‌کنندگی سرعت تهویه موجب کاهش دما در زیر سقف تونل و در بالای منبع آتش می‌شود. اختلاف دمای بیشینه در کار آزمایشگاهی و حل عددی حدود 34°C است. بعد از مجرای تهویه، دما در زیر سقف تونل شدیداً افت پیدا می‌کند که نشان‌دهنده تأثیر وجود مجرای و خروج دود از طریق آن است. همچنین توزیع دما در تونل به صورت همگن نیست و وابستگی شدیدی به فاصله از منبع آتش دارد.

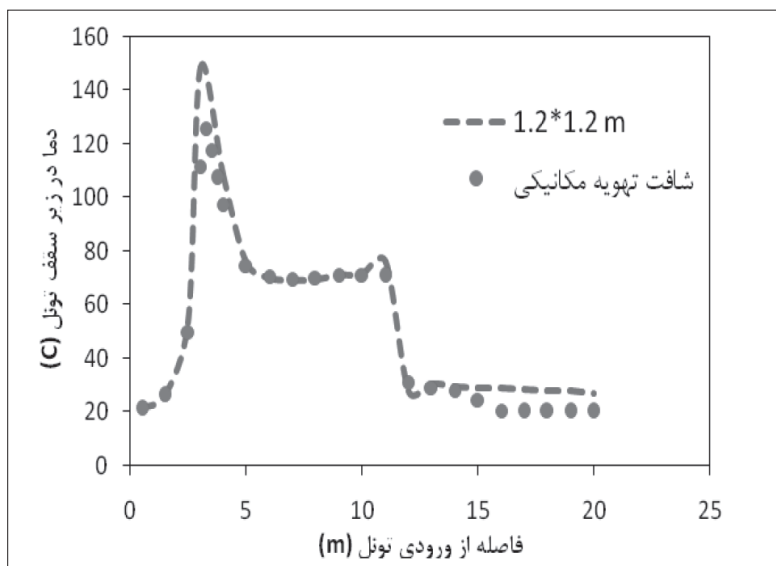
در همه حالات ثابت و برابر با 1 m.s^{-1} و دبی جریان خروجی در حالت مجرای تهویه مکانیکی $2/5\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ است. شکل ۴ نمونه‌ای از هندسه تونل مدل شده در نرم‌افزار را نشان می‌دهد.

شکل ۴ نتایج حاصل از مدل‌سازی و مقایسه آن با کار تجربی نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشخص است منحنی‌های توزیع دما در زیر سقف تونل از نظر شکل مشابه همدیگر هستند و تنها اختلاف در ناحیه نزدیک به آتش دیده می‌شود. دلیل این اختلاف می‌تواند ناشی از تفاوت در



شکل ۹: توزیع جریان دود در تونل

الف) سطح مقطع مجرای تهویه $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ (ب) $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$



شکل ۱۰: مقایسه توزیع دما در زیر سقف تونل در دو حالت مجرای تهویه مکانیکی و مجرای تهویه

طبیعی با سطح مقطع $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ و $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m}$



۴- نتیجه گیری

همان طور که دیده شد، استفاده از مجرای تهویه، سبب خروج دود و کاهش دما در تونل و در نزدیکی مجرای تهویه می شود و امکان کنترل جریان دود در پایین دست مجرای تهویه و محدود کردن ناحیه آتش و حرارت در فاصله بین محل وقوع منبع آتش و مجرای تهویه وجود دارد.

در مجرای تهویه طبیعی، عامل خروج دود و گازهای داغ ناشی از آتش سوزی اختلاف ارتفاع به موجب نیرو بویانسی است. در شرایطی که ارتفاع مجرای تهویه طبیعی یکسان است، نیروی بویانسی ثابت است بنابراین افزایش سطح مقطع مجرای، سبب افزایش دبی جریان خروجی از مجرای تهویه طبیعی می شود؛ بنابراین بهتر است سطح

می شود (شکل ۹).

شکل ۱۰ توزیع دما در زیر سقف تونل در دو حالت مجرای تهویه مکانیکی و مجرای تهویه طبیعی که سطح مقطع خروجی آن ها به ترتیب $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ و $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ است نمایش می دهد. همان گونه که مشخص است با افزایش سطح مقطع مجرای تهویه طبیعی خروج جریان دود افزایش یافته و به عملکرد مجرای تهویه مکانیکی نزدیک می شود و تغییرات توزیع دما در هر دو حالت تقریباً یکسان است؛ بنابراین در هنگام استفاده از مجرای تهویه طبیعی بهتر است سطح مقطع خروجی تا حد ممکن زیاد باشد تا جریان دود بیشتری از مجرای تهویه خارج شود و عملکرد سامانه تهویه طولی همراه با مجرای تهویه طبیعی افزایش یابد.